3К

УДК 53.072, 53.681.3

Ю.Г. Кривонос, В.Г. Писаренко
Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины, г. Киев, Украина
jvpisarenko@mail.ru

Управление оперативным обнаружением и нейтрализацией разлива нефтепродуктов на поверхности акватории на базе прогнозирования процессов поверхностной турбулентной диффузии

В статье решается задача построения информационных моделей вклада процессов турбулентного массопереноса в задачу распознавания поверхностных загрязнений океана. Используется концепция комплексной информационной технологии доразведки и нейтрализации опасных экологических происшествий (ЭП). Рассматриваются два примера: ранняя и поздняя нейтрализация распространяющегося нефтяного пятна в море. На основании расчетов делается вывод об эффективности принятия оперативных мер по нейтрализации, что позволяет сократить общий ущерб и затраты на нейтрализацию в 4248 раз по сравнению с «поздней» нейтрализацией, в 10 раз (по темпу принятия мер) по сравнению с оптимальной стратегией.

Введение

В статье решается задача построения информационных моделей вклада процессов турбулентного массопереноса в задачу распознавания поверхностных загрязнений океана. Предлагается учитывать турбулентные течения в гетерогенной жидкой среде. Применена концепция комплексной информационной технологии доразведки и нейтрализации опасных экологических происшествий, предложенная в работе авторов [1-4]. Эта концепция использует информационно-аналитическую систему поддержки принятия решений [5], [6] при имитационном прогнозном моделировании различных сценариев развития ЭП в окружающей среде. При этом учитывается значительная и неизбежная доля неопределенности задачи, обусловленная гетерогенностью и нестационарностью физико-механических свойств среды (гидросфера, атмосфера, литосфера) и стохастичностью ее динамики (в частности, вариабельность гидрометеоусловий).

В связи с этим для рассматриваемых целей представляет интерес проанализировать уравнения турбулентной диффузии и их решения, полезные для моделирования динамики поверхностных загрязнений океана [7].

Уравнения турбулентной диффузии для океана

При формулировке имитационной модели распространения поверхностных загрязнений в водной среде в качестве эволюционных уравнений используются уравнения турбулентной диффузии. Для формулировки этих уравнений используется описание переноса примесей разных сортов в приповерхностных слоях рассматриваемого

объема, и при этом для каждой характеризующей водную среду функции $U_i(x, y, z, t)$ (например, распределение скорости, температуры, плотности, концентрации примеси) используют представление в виде суммы медленно меняющейся функции $U_{ic}(x, y, z, t)$ и пульсаций $U_{ni}(x, y, z, t)$:

$$U_i(x, y, z, t) = U_{ic}(x, y, z, t) + U_{ni}(x, y, z, t). \tag{1}$$

При усреднении $< . >_D$ по малому четырехмерному объему $D \subset R_4$ функция $U_{ni}(x, y, z, t)$ дает нуль. А для усредненного значения медленно меняющейся функции $< U_i(x, y, z, t) >_D = U_{ic}(x, y, z, t)$ получим уравнение движения следующего вида:

$$\partial C / \partial t + \sum_i U_i \partial C \ / \partial x_i = \sum_i \sum_j \partial / \partial x_i (K_{ij} \partial C / \partial x_j), \tag{2}$$

где C – осредненная концентрация вещества-примеси, K_{ij} – тензор коэффициентов турбулентной диффузии, определяемых как коэффициенты пропорциональности между турбулентным потоком примеси $-\rho\, C_k U_j$ и градиентом ее осредненной концентрации $\partial C_к / \partial x_i$:

$$-\rho\, C_k U_j = \rho \Sigma_i \Sigma_j K_{ij} \ \partial C_к / \partial x_i. \tag{3}$$

Несмотря на большую актуальность для различных приложений в океанологии и дистанционном контроле окружающей среды, существует мало работ по получению модельных решений уравнений турбулентной диффузии, которые удовлетворительно описывают наблюдаемую многоступенчатость (например, указанные ниже зависимости (10), (11)) процесса распространения нефтяных или иных токсичных загрязнений. Обзор ряда работ этого направления можно найти в нашей работе [1].

В данной статье приводится вместе с доказательством новое семейство точных решений уравнений (1) для достаточно общей зависимости компонентов скорости и коэффициентов турбулентной диффузии следующей формы:

$$K_{11} = K_{11}(y,z);\ K_{13} = K_{13}(y,z);\ K_{22} = K_{22}(x,z);\ K_{31} = K_{31}(x,y,z);\ K_{33} = K_{33}(x,y,z);$$

$$K_{12} = K_{21} = K_{23} = K_{32} = 0 \tag{4}$$

$$U_i = U_i\,(x, y, z),\ \ i = 1, 2, 3.$$

Исходное уравнение (2) примет форму

$$\begin{aligned}&\partial C / \partial t + U_1(x, y, z) \partial C / \partial x + U_2(x, y, z) \partial C / \partial y + U_3(x, y, z) \partial C / \partial z = \\ &= [K_{11} \partial^2 C_k / \partial x^2 + K_{13} \partial^2 C / \partial x \partial z] + K_{22} \partial^2 C / \partial y^2 + \partial / \partial z [K_{31} \partial C / \partial x + K_{33} \partial C / \partial z].\end{aligned} \tag{5}$$

Для последнего уравнения в данной работе получено следующее утверждение [8].

Утверждение А.

При условиях

$$x^2 + by^2 - 4x^2 K_{11} - 4b^2 y^2 K_{22} = W = const, \tag{6}$$

$$x\, U_1(x,y,z) + byU_2(x,y,z) - K_{11} - K_{22} - x\ \partial K_{31} / \partial z = Q = const \tag{7}$$

уравнение (5) имеет семейство точных решений для концентрации примеси вида:

$$C(t,x,y,z) = B\, t^Q \exp(W/t) \exp[(-x^2 - b\, y^2)/t]. \tag{8}$$

По физическому смыслу представляют интерес прежде всего следующие ограничения на параметры семейства:

$$W < 0. \tag{9}$$

Пример. Пусть для семейства решений уравнений турбулентной диффузии (5) из утверждения А выполняются условия:

$$K_{11} = const_1;\ K_{22} = const_2;\ K_{31} = K_{31}(x,y,z) = \psi\cdot z. \qquad (10)$$

Тогда соотношение (6) и (7) принимает вид соответственно:

$$x^2\ (-1 + 4K_{11}) + y^2\ (-\ b + 4b^2K_{22}) = -\ W = const_3 > 0, \qquad (11)$$

$$x(U_1 - \psi) + byU_2 = Q + K_{11} + K_{22}. \qquad (12)$$

Очевидно, что кривая второго порядка (11) при естественных условиях

$$((1 - 4K_{11})/W) > 0; \qquad (b(1 - 4b)/W) > 0 \qquad (13)$$

имеет вид эллиптического цилиндра с образующей параллельно оси Oz; а уравнение (12) – уравнение плоскости, перпендикулярной плоскости $z = 0$. Совместное решение системы уравнений (11), (12), которое существует в ограниченной пространственной области $\Re$ (размеры области следуют из требований совместности решений уравнений (11) и (12)), дает для заданных значений констант W и Q две прямые, параллельные оси Oz. При этом в области значений $x,\ y\ \in \Re$ в соответствии с формулой (8) решение будет (с ростом времени) при больших временах убывать по закону:

$$G(x, y, z, t) \propto t^Q \exp(W/t) \exp[(-\ x^2 - b\ y^2)/t]. \qquad (14)$$

Построенные в этом примере решения дают вариант закона массопереноса из ограниченной области $\Re$ за пределы границы этой области в силу действия турбулентных течений, рассмотренных в данном примере. Для других значений коэффициентов турбулентной диффузии $K_{ij}\ (x, y, z)$ можно построить иные варианты массопереноса в силу действия турбулентных течений.

Наблюдения массопереноса турбулентных течений на поверхности океана проводилось многочисленными исследователями для различных случаев (как индикатор течений использовались пятна красителей в воде или системы буев со спутниковым координатоопределением). Краткие результаты подобных экспериментов [9-11] приведены ниже.

Авторами в работе [1] была предложена аналитическая аппроксимация этой эмпирической закономерности для функции $\sigma^2 = f\,(t^3)$ в следующем виде:

$$\sigma^2\ (t) = a_1\, t^3, \text{ если } t \in [0, t_1];$$

$$\sigma^2\ (t) = a_1\, t^3, \text{ если } t \in (t_1, t_2);$$

$$\sigma^2\ (t) = a_2\, t^3, \text{ если } t \in [t_2, t_3];$$

$$\sigma^2\ (t) = a_2\, t^3, \text{ если } t \in (t_3, t_4);$$

$$\sigma^2\ (t) = a_3\, t^3, \text{ если } t > t_4, \qquad (15)$$

где

$$t_1 = 10^{4,3}\text{ с};\ t_2 = 10^{4,9}\text{ с};\ t_3 = 10^{5,3}\text{ с};\ t_4 = 10^{5,5}\text{ с};$$

$$a_1 = 10^{-3,9}\text{ см}^2\text{ с}^{-3};\ a_2 = 10^{-5,7}\text{ см}^2\text{ с}^{-3};\ a_3 = 10^{-6,5}\text{ см}^2\text{ с}^{-3}. \qquad (16)$$

Получение оценок для осредненных параметров турбулентной диффузии

Наряду с методом отыскания решений непосредственно уравнений турбулентной диффузии (2) или (5) иногда используют разнообразные методики получения оценок усредненных (в смысле усреднения $< . >_D$ по малому четырехмерному объему $D \subset R_4$) ряда важнейших характеристик явления турбулентной диффузии.

Так, в работе [12] приводится модель учета вклада сдвиговых течений в турбулентную диссипацию исходной энергии необрушивающихся волн. При этом скорость диссипации (квадрат тензора «градиента» скорости, умноженный на эмпирический коэффициент) энергии таких волн вычисляется как сдвиг скорости течения (т.е. квадрат градиента скорости течения, помноженный на коэффициент турбулентной вязкости) плюс диффузия турбулентной и волновой кинетической энергии.

Из последних публикаций автор работы [10] делает вывод, что аналогия с моделью сдвиговой свободной турбулентности, когда скорость диссипации турбулентной энергии ε_m с глубиной z, даваемая известной зависимостью

$$< \varepsilon_m >\sim z^{-4} \tag{17}$$

не удовлетворяет наблюдениям для воздействия ветрового волнения с опрокидывающимися волнами. Утверждается при этом, что лучше подходит здесь более медленный спад ε_m с удалением z от поверхности океана в форме зависимости [10]:

$$<\varepsilon_m >\sim z^{-2}. \tag{18}$$

В работе [11] обсуждается сходство и различия результатов теории турбулентности, а также статических моделей морского волнения. Сходство состоит в идентичности выражений для частотных лагранжевых спектров турбулентности и временных спектров волнения, измеренных для ускорений, скоростей и смещений для соответствующих временных масштабов. В частности, в обоих случаях средний квадрат смещений $<r^2>$ жидкой частицы оказывается порядка (формула Дж. Бэтчелора [13]):

$$< r^2 > \sim \varepsilon\tau^3, \tag{19}$$

где ε – мощность на единицу массы, закачиваемая в поток, τ – время наблюдений. Для турбулентности и морского волнения существуют так называемые инерционные интервалы, в которых энергия переносится по спектру масштабов от крупных к мелким [11].

Приложение к задаче оперативной поэтапной разведки и нейтрализации разлива нефти на поверхности акватории

Рассмотрим применение названной методики к задаче оперативного обеспечения разведки опасных внезапных экологических происшествий типа разлива нефти на поверхности моря или большого водохранилища и последующих мер по его нейтрализации с оперативным измерением размеров области влияния развивающегося ЭП. Выделим следующие стадии процесса:

а) предварительный анализ исходной поступившей информации о потенциально опасном экологическом происшествии на предмет его идентификации и оценки ожидаемого ущерба;

б) предварительный анализ степени ожидаемой опасности данного ЭП, оценка будущих размеров зоны его воздействия и размера ожидаемого материального ущерба от его воздействия на техносферу и природную среду;

в) анализ источников и характера неопределенности, содержащейся в совокупности исходных данных об ЭП и мотивированный выбор дополнительных мер для добывания недостающей информации об ЭП;

г) реализация мер для добывания недостающей информации об ЭП;

д) повторный анализ всей поступившей информации о развитии и природе ЭП, включая новые данные;

е) принятие по результатам анализа, в случае необходимости, решения о неотложных мерах по частичной нейтрализации ЭП с целью уменьшения ожидаемого ущерба от ЭП;

ж) реализация решения о неотложных мерах по частичной нейтрализации ЭП, адекватных результатам идентификации степени опасности ЭП и объема ущерба от него;

з) повторный анализ ожидаемого ущерба от ЭП для различных сценариев его развития и характера принимаемых мер нейтрализации с уточнением степени опасности ЭП и объема ущерба для разных сценариев его развития и принимаемых мер по его нейтрализации;

и) повторная разведка состояния зоны воздействия ЭП и реально наблюдаемых его последствий;

к) дополнительный анализ всей поступившей и уже имевшейся информации о развитии зоны воздействия ЭП и природных ЭП с принятием решения о целесообразности или нецелесообразности новой доразведки и принятия дальнейших мер по нейтрализации ЭП;

л) цикл е $\rightarrow$ ж$\rightarrow$ з$\rightarrow$ и $\rightarrow$к повторять до тех пор, пока все затраты на нейтрализацию ЭП будут оставаться ниже известного «порога рентабельности» всех принятых мер по доразведке и нейтрализации ЭП.

Для учета закономерности процессов переноса токсичных веществ, возникающих из очага ЭП в морской среде, могут учитываться по установленным экспериментально математическим зависимостям расширения зоны влияния за счет явлений разномасштабной турбулентной диффузии в приповерхностных слоях водных масс.

Установленные экспериментально математические зависимости расширения зоны влияния ЭП в морской воде за счет явлений разномасштабной турбулентой диффузии будем моделировать в соответствии с эмпирическими закономерностями, принятыми авторами [8] и представленными выше уравнениями (15), (16).

Оценка величины ущерба $S_y(t)$ ресурсам природопользования на момент t от начала разлива нефти для случая распространения в море (за счет дрейфа) нефтепятна, формируемого непрерывно действующим источником выбросов нефти в акваторию моря в условиях практически постоянной погоды и до момента контакта пятна с берегом с большой вероятностью может быть рассчитана по следующей формуле:

$$S_y(t) = ((4/3)(v_{\partial p}^3\, t^3/a)^{1/2} + (\pi/2)(v_{\partial p}\, t\,/a))\, H_{cp} \Sigma_i\, W_i(D_t), \qquad (20)$$

где $W_i(D_t)$ – средняя плотность ущерба (имеет размерность долл./(сут. км^3)) здоровью людей, хозяйственной деятельности и водной биосфере от воздействия токсичного фактора i-го типа в области пространства и времени D_t, $v_{\partial p}$ – скорость дрейфа нефтепятна из-за воздействия течений и ветра, a = 8,8 $v_{\partial p}$ ч/км^2, причем

суммирование по индексу i в правой части (20) проводится по всем учитываемым типам токсических компонентов нефти от $i = 1$ до $i = N$; H_{cp} – средняя глубина акватории в рассматриваемой области D_t.

Значение «порога рентабельности» всех принятых мер по доразведке и нейтрализации ЭП получают из оценки положения минимума на кривой суммарных затрат $S_y(t) + S_в(t)$ на «доразведку ЭП + нейтрализация ЭП + ущерб от ЭП», причем $S_y(t)$ – величина ущерба ресурсам природопользования, $S_в(t)$ – сумма затрат на сеанс необходимой доразведки ЭП в момент t и затрат на оперативные меры нейтрализации ЭП.

Пример 1. Рассмотрим в качестве ЭП распространяющееся пятно разлива нефти от непрерывно действующего источника типа морской платформы в северо-восточной части Северного Каспия (источник – типа скважины «Сункар» во время аварии 2000 г.) в условиях дрейфа в западно-юго-западном направлении из-за воздействия течений и ветров, что вызывает миграцию нефтепятна в этом же направлении до о-вов Жемчужный и Тюлений в северозападной акватории моря.

Анализ показывает, что в качестве основных факторов вредного воздействия на биосферу данного региона следует считать отравление ароматическими углеводородами и сульфидами (наиболее токсичные компоненты нефтепродуктов) осетровых рыб (наиболее ценные виды рыб в регионе) и каспийских тюленей. При этом в расчете ущерба по формуле (20) принимаем N=2, а при учете только ущерба осетровых от воздействия ароматических углеводородов нефти получаем для среднего значения (по объему и по времени) $<C_a>$ концентрации соответствующего токсического фактора C_a в условиях воздействия нефтяного пятна

$$<C_a> \approx 10^9 \text{ долл.}/ S_o\, H_{cp}.t_{omp}, \qquad (21)$$

где S_o – площадь акватории обитания осетровых рыб в Каспии, H_{cp} – средняя глубина этой акватории (следует учитывать только глубины не более 10 м, отвечающие зонам распреснения морской воды речными стоками), t_{omp} – длительность «экспозиции» гидробионта в воде с летальной концентрацией токсиканта типа i до достижения стадии непригодности для использования в рыбном хозяйстве. Для оценки можно взять $S_o \approx 180000$ км^2. Для оценки средней глубины в Северном Каспии можно взять $H_{cp} = 5$ м, а для ароматического углеводорода нефти положить $t_{omp} \approx 10$ сут, и тогда по формуле (21) находим:

$$<C_a> \approx 18000 \text{ долл.}/(H_{cp}.\text{км}^2 \text{ сут}). \qquad (22)$$

Для оценки ущерба от воздействия ароматическими углеводородами и сульфидами нефти воспользуемся формулой (20) с двумя слагаемыми в последнем сомножителе:

$$S_y(t) = ((8/15)(v_{\partial p}^3\, t^5/a)^{1/2} + (\pi/4)(v_{\partial p}\, t^2 /a))\, H_{cp}\,(W_a(D_t) + W_c(D_t)), \qquad (23)$$

где $W_a(D_t)$ и $W_c(D_t)$ – средняя плотность ущерба от воздействия ароматических углеводородов и сульфидов соответственно, которые для разлива нефти типа, имевшего место в 2000 г. на Северном Каспии, могут быть оценены следующим образом:

$$W_a(D_t) \approx 6000 \text{ долл.}/(H_{cp}\, \text{км}^2 \text{ сут}); \quad W_c(D_t) \approx 1000 \text{ долл.}/(H_{cp}\, \text{км}^2 \text{ сут}). \qquad (24)$$

Для скорости дрейфа пятна нефти $v_{\partial p} = 70$ м/ч получаем далее:

$$a = 8{,}8\, v_{\partial p}\, \text{ч/км}^2 = 0{,}616 \text{ 1/км}, \qquad (25)$$

на основании чего для нескольких возрастающих моментов времени вычисляем значения ущерба в соответствии с табл. 1.

Таблица 1 – Зависимость ущерба от разлива нефти со временем при непрерывно действующем источнике разлива и в отсутствие мер нейтрализации

Время, ч	1	10	100
Ущерб, долл.	29,66	3761,7	15404900

Пример 2. Рассмотрим в качестве ЭП распространяющееся пятно разлива нефти от источника типа морской платформы в северо-восточной части Северного Каспия, подобного рассмотренному в предыдущем примере 2, но в отличие от последнего, действующего в течение ограниченного интервала времени с $t = 0$ до $t = t_f$ в условиях дрейфа в западно-юго-западном направлении из-за воздействия течений и ветров, что вызывает миграцию нефтепятна в этом же направлении до о-вов Жемчужный и Тюлений в северозападной акватории моря.

Для этого случая с помощью выражения (20) получаем для ущерба от разлива нефти на текущий момент $t > 0$:

$$S_y(t) = ((8/15)(v_{\partial p}^3 /a)^{1/2}(t^{5/2} - t_f^{5/2}) + (\pi/4)(v_{\partial p} /a))(t^2 - t_f^2)H_{cp}\Sigma_i W_i(D_t). \quad (26)$$

Пусть к моменту $t = t_f = 99$ часов источник разлива прекратил выброс нефти. Тогда изменение площади нефтяного пятна из-за дрейфа и процессов турбулентной диффузии на текущий момент $t > 0$:

$$\sigma_n(t) = (4/3)(v_{\partial p}^3 /a)^{1/2}(t^{3/2} - t_f^{3/2}) + (\pi/2)(v_{\partial p} /a))(t - t_f). \quad (27)$$

Пусть скорость дрейфа $v_{\partial p} = 70$ м/ч. Данные для нескольких возрастающих моментов времени о получаемой площади пятна представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Изменяющаяся площадь пятна со временем

Время, ч	1	10	100
Площадь пятна, км^2	0,9302	25,5	767,1

Вычисленные значения ущерба в соответствии с табл. 2 для нескольких возрастающих моментов времени показаны в табл. 3 (которая отличается от табл. 1 только последним столбцом).

Таблица 3 – Зависимость ущерба от разлива нефти со временем при непрерывно действующем источнике разлива и в отсутствие мер нейтрализации

Время, ч	1	10	100
Ущерб, долл.	29,66	3761,7	15404871

С точки зрения затрат на нейтрализацию разлива нефти на морской поверхности существенно, что сбор 1 тонны разлитой нефти с применением спецсудов обходится в 5÷10 тыс. долл. Поэтому с учетом (27) получаем в данном примере для величины расходов на нейтрализацию разлива нефти оценку, приведенную в табл. 4.

Таблица 4 – Величины расходов на нейтрализацию разлива нефти

Время, ч	1	10	100
Средние затраты на нейтрализацию, тыс. долл.	6,97	191,25	5753,03

Тогда при условии, что меры по нейтрализации полностью привели к устранению из акватории разлитой нефти, получим для суммы затрат на нейтрализацию пятна и полученного ущерба от разлива нефти данные из табл. 5.

Таблица 5 – Сумма затрат на нейтрализацию пятна и полученного ущерба от разлива нефти

Время, ч	1	10	100
Сумма ущерба и затрат на нейтрализацию, тыс. долл.	36,63	3761,7	154048 71

Данные из табл. 4 и 5 показывают, что если в конце каждого часа делать нейтрализацию разлитой нефти, разлитой от источника, действующего с одинаковой интенсивностью только в течение $t = t_f = 99$ часов, то общие затраты на нейтрализацию составят 99·6,97 = 690,03 тыс. долл., а общий ущерб от воздействия разлива нефти составит 99·29,66 = 2936,34 тыс. долл. При этом сумма ущерба от воздействия разлива нефти и затрат на нейтрализацию составит 3626,37 тыс. долл., что в 4248 раз меньше соответствующих данных при «поздней» нейтрализации (т.е. при $t = 100$ часов) и в 11 раз меньше, чем при нейтрализации через каждые 10 часов.

Данный пример выбора оптимальной стратегии разведки и нейтрализации разлива нефти в море демонстрирует эффективность предлагаемого способа оперативного обеспечения разведки и нейтрализации опасных экологических происшествий.

Выводы

Предлагаются информационные модели вклада процессов турбулентного массопереноса в задачу распознавания поверхностных загрязнений океана. Учитывается вклад турбулентных течений в гетерогенных жидких средах. Получено семейство точных решений уравнений турбулентной диффузии. Это семейство сопоставлено с данными наблюдений.

Используется предложенная ранее авторами концепция комплексной информационной технологии доразведки и нейтрализации опасных экологических происшествий (ЭП) с учетом структуры информационно-аналитической системы поддержки принятия решений при имитационном прогнозном моделировании различных сценариев развития ЭП в окружающей среде.

Для поставленных целей построены точные решения уравнений турбулентной диффузии, которые затем проанализированы применительно к моделированию динамики поверхностных загрязнений океана. Рассмотрено два примера разлива нефти в море в условиях воздействия ветрового дрейфа загрязнения. Для этих примеров сопоставлена результативность разных стратегий нейтрализации распространяющегося нефтяного пятна. Делается вывод об эффективности принятия оперативных мер по нейтрализации, что позволяет сократить общий ущерб и затраты на нейтрализацию в 4248 раз по сравнению с «поздней» нейтрализацией, в 10 раз (по темпу принятия мер) в сравнении с оптимальной стратегией.

Литература

1. Кривонос Ю.Г., Писаренко В.Г., Чайковский О.И. Интеллектуальные комплексные технологии оптимальной маршрутизации в многомерном пространстве сценариев доразведки и нейтрализации опасного экопроисшествия // Проблемы управления и информатики. – 2004. – № 4. – С.129-145.
2. Кривонос Ю.Г., Писаренко В.Г., Чайковский О.И. Интеллектуальные системы принятия оптимальных решений при комплексном распознавании, доразведке и нейтрализации опасного экологического происшествия // Искусственный интеллект. – 2004. – № 3. – С. 305-319.

3. Кривонос Ю.Г., Писаренко В.Г., Чайковский О.И. Интеллектуальные технологии для реализации оптимальной стратегии снижения ущерба от природных и техногенных катастроф // Искусственный интеллект. – 2005. – № 3. – С. 436-445.
4. Кривонос Ю.Г., Писаренко В.Г., Писаренко Ю.В. Формирование информационно-аналитической системы поддержки задач раннего обнаружения, доразведки и нейтрализации опасных экологических происшествий // Искусственный интеллект. – 2006. – № 3.
5. Писаренко В.Г., Писаренко Ю.В. Вопросы виртуального проектирования систем, ориентированных на создание интеллектуализированных роботов для мониторинга экстремальных состояний техносферы. Часть 1 // УСиМ. – Киев. – 2005. – № 4. – С. 8-18.
6. Писаренко Ю.В. Віртуальне проектування інтелектуалізованих роботів для розвідки і нейтралізації небезпечних екологічних подій: Автореф. дис... к. техн. наук. – Київ: Інстит кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, 2006. – 20 с.
7. Шипицын С.Я., Бабаскин Ю.З., Писаренко В.Г., Дубоделов В.И., Золотарь Н.Я., Смульский А.А., Фикссен В.Н., Короленко Д.Н. Повышение эффективности внепечной обработки сталей модифицированием азотом // Процессы литья. – 2006. – № 1. – С. 30-39.
8. Кривонос Ю.Г., Писаренко В.Г. Точные решения уравнения турбулентной диффузии в задачах управления кристаллизацией металла // Искусственный интеллект. – 2007.– № 3. – С. 469-475.
9. Физика океана. – М.: Наука.– 1978. – Т.1: Гидрофизика океана. – 456 с.
10. Kitaigorodskii S.A. On influence of wind breaking on the structure of the subsurface oceanic turbulence // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2001. – Т. 37. – № 4. – С. 566-576.
11. Голицын Г.С. Методические основы турбулентности и морского волнения // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2001. – Т. 37, № 4. – С. 438-445.
12. Чухарев А.М. Вклад необрушивающихся ветровых волн и сдвига скорости дрейфового течения в турбулентный обмен // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2003. – Т. 39, № 5. – С. 673-679.
13. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости. – М.: Мир, 1973. – 760 с.

Ю.Г. Кривонос, В.Г. Писаренко

Керування оперативним виявленням і нейтралізацією розливу нафтопродуктів на поверхні акваторії на базі прогнозування процесів поверхневої турбулентної дифузії

Вирішується завдання побудови інформаційних моделей внеску процесів турбулентного перенесення мас у завдання розпізнавання поверхневих забруднень океану. Використовується концепція комплексної інформаційної технології дорозвідки і нейтралізації небезпечних екологічних подій (ЕП). Розглядаються два приклади: рання й пізня нейтралізація нафтової плями, що поширюється у морі. На підставі розрахунків робиться висновок про ефективність вживання оперативних заходів із нейтралізації, що дозволяє зменшити загальні збитки і витрати на нейтралізацію в 4248 разів порівняно з «пізньою» нейтралізацією, 10 разів (за темпом вживання заходів) порівняно з оптимальною стратегією.

Yu. G. Krivonos, V. G. Pisarenko

Management of Operative Detection and Neutralization of Flood of Mineral oil on a Water Area Surface on the Basis of Superficial Turbulent Diffusion Forecasting Processes

The problem of information models building of the processes turbulent mass transfer contribution in a problem of recognition of superficial pollution in ocean is solved. Used concept of integrated information technology of reconnaissance and neutralization dangerous environmental accidents (EA). Two examples: early and late neutralization spreading oil slick at sea. On the basis of calculations the conclusion about efficiency of acceptance of operative measures on neutralization is done, that allows to reduce the general damage and expenses for neutralization in 4248 times in comparison with «late» neutralization in 10 times (on rate of acceptance of measures) in comparison with optimum strategy.

Статья поступила в редакцию 01.07.2008.